

УДК 621.91

Г.П. Клименко, д-р техн. наук, Я.В. Васильченко, канд. техн. наук,  
А.Н. Лищенко, Краматорск, Украина

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕГЛАМЕНТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ ТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ С ЧПУ**

*Розроблено режими різання для важких верстатів з ЧПУ. Метою даної роботи є підвищення ефективності важких верстатів з ЧПУ на основі банку статистичних показників заводського виготовлення різальних інструментів. Період стійкості інструменту залежить від ймовірності руйнування і надійності. Для визначення періоду стійкості інструменту отримані математичні моделі. Розроблено методику розрахунку сумарної стійкості інструменту. Це дає можливість зменшити кількість різючих інструментів, що використовуються для важких токарних верстатів і з'ясувати шляхи вдосконалення експлуатації ріжучого інструменту та зменшити його витрати.*

*Ключові слова: режими різання, важкі верстати з ЧПУ, період стійкості, інструмент*

*Разработаны режимы резания для тяжелых станков с ЧПУ. Целью данной работы является повышение эффективности тяжелых станков с ЧПУ на основе банка статистических показателей заводского изготовления режущих инструментов. Период стойкости инструмента зависит от вероятности разрушения и надежности. Для определения периода стойкости инструмента получены математические модели. Разработана методика расчета суммарной стойкости инструмента. Это дает возможность уменьшить количество используемых режущих инструментов для тяжелых токарных станков, и выявить пути совершенствования эксплуатации режущего инструмента и уменьшить его расход.*

*Ключевые слова: режимы резания, тяжелые станки с ЧПУ, период стойкости, инструмент*

*Cutting conditions for heavy CNC machines was developed. The increasing efficiency of heavy CNC machines is the purposed of this paper on basic of the bank of statistical indexes prefabricated cutting tools. The period of tool life depends on probability of destruction and reliability. The mathematical models are received for definition of the period of tool life. The method of calculation of the summary tool life was developed. It gives possibility to decrease the quantity of using cutting tools for heavy lathes. That gave the possibility to find out the ways for improving of cutting tools exploitation and to decrease its use up.*

*Keywords: cutting conditions, heavy CNC machines, period of tool life, cutting tool*

Эффективность использования тяжелых станков, повышение качества выпускаемой продукции металлообработки, снижение расхода инструментальных материалов существенно зависят от разработки научно обоснованных режимов резания, оказывающих существенное влияние на условия труда и технико-экономические показатели машиностроения. Особенности работы тяжелонагруженного режущего инструмента, большое рассеивание параметров обработки на тяжелых станках, многообразие факторов, влияющих на обработку деталей, требуют комплексного подхода для определения управляющих параметров при работе тяжелых станков.

Поэтому определение рациональных регламентов эксплуатации тяжелых станков является актуальной проблемой.

Определенный комплекс исследований процесса эксплуатации режущих инструментов на тяжелых станках [1, 2, 3], разработка системы рациональной эксплуатации режущего инструмента легли в основу разработанных нормативов режимов резания для тяжелых токарных и карусельных станков [4].

Разработанные нормативы отличались от существующих более дифференцированными рекомендациями по выбору подачи, учетом конструкции и надежности инструментов, виброустойчивости станков и прочими рекомендациями. Математические модели для оптимизации режимов резания разрабатывались на основе статистического банка данных, отражающего состояние металлообработки на тяжелых станках прошлого века.

В связи с появлением новых условий производства, новых инструментальных и обрабатываемых материалов, современных конструкций станков и инструментов возникла необходимость пересмотреть рекомендации разработанных нормативов, учесть новые факторы и методические подходы при определении регламентов эксплуатации тяжелых станков.

**Целью настоящей работы** является повышение эффективности работы тяжелых станков путем определения рациональных регламентов их эксплуатации.

Под регламентами эксплуатации инструментов на тяжелых станках с ЧПУ подразумевается значения элементов режимов резания и расхода режущих элементов: глубина резания, подача, скорость резания, число периодов стойкости, расход инструмента.

Эффективность эксплуатации станков с ЧПУ во многом определяется их правильным технологическим использованием – рациональным построением технологического процесса и, в частности, выбором режимов резания, обеспечивающих увеличение надежности и производительности обработки.

Увеличение надежности обработки крупногабаритных деталей при использовании предельных глубины резания и подачи может быть достигнуто путем устранения технологических перегрузок, возникающих обычно в момент врезания и выхода инструмента из зоны резания. Производительность и надежность повышают также путем рационального выбора скорости резания.

В связи с высокой стоимостью тяжелых токарных станков с ЧПУ, использованием дорогостоящих режущих инструментов со сменными многогранными пластинами и быстросменной оснасткой периоды стойкости инструментов выбирают более низкими, чем это рекомендуется справочной литературой, а режимы обработки – выше.

Рекомендации по выбору режимов резания и норм расхода инструмента вошли в новые нормативы режимов резания для станков с ЧПУ.

Одной из основных задач определения режимов резания является установление стойкости инструмента, обеспечивающей наиболее рациональный режим работы. Нормативы рассчитаны для определения стойкости в минутах резания, наиболее экономичной при работе на серийно выпускаемых станках с ЧПУ токарной группы резцами с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин.

В основу математических моделей для оптимизации режимов резания положено значение среднего периода стойкости, который для станков с ЧПУ принят 20 мин в отличие от универсальных тяжелых станков.

Инструмент, используемый на станках с ЧПУ, работает в условиях многоинструментной наладки последовательного действия. В течение периода стойкости инструмент может использоваться при обработке партий различных деталей. Цикл обработки осуществляется автоматически. Выбор инструмента производится с учетом возможности обработки различных поверхностей определенной группы деталей. Режимы резания назначаются для материала, который предполагается наиболее часто обрабатывать на данном станке. При этом необходимо учитывать особенности построения технологического процесса для станков с ЧПУ (схемы перемещения инструмента, разбиение припуска по проходам, возможность плавного изменения скорости резания и подачи в процессе обработки и т. п.).

При разработке общемашиностроительных нормативов режимов резания для тяжелых станков расчет рациональных режимов резания осуществляется совместно с определением периода стойкости резцов и чисел периодов их стойкости, соответствующих экстремуму их функций. При этом математические модели формировались на основе среднего периода стойкости, учитывающего как процесс изнашивания, так и процесс разрушения инструмента. Средний фактический период стойкости в этом случае определяется как:

$$T = q_u \cdot T_u + q_p \cdot T_p = T_u \cdot x, \quad (1)$$

где  $T_p$  и  $T_u$  – средние периоды стойкости, обусловленные соответственно разрушением и износом инструмента;

$q_u$  и  $q_p$  – вероятности появления отказа соответственно износа и разрушения ( $q_u = 1 - q_p$ , учитывая, что сумма вероятностей износа и разрушения равен единице);

$x$  – коэффициент, учитывающий изменение периода стойкости в связи с разрушением инструмента.

$$x = (1 - q_p) + q_p \cdot \frac{T_p}{T_u}. \quad (2)$$

Учитывая, что определение периода стойкости, обусловленного изнашиванием инструмента, производится на основе общеизвестных стойкостных зависимостей, представляет интерес установление зависимости

отношения периодов стойкости до разрушения и износа от вероятности разрушения инструмента. Для этого произведены исследования плотностей распределения периодов стойкости до соответствующего вида отказа. Распределение периода стойкости до разрушения инструмента характеризует распределение его прочности. Распределение периода стойкости до износа характеризует износостойкость инструмента.

Разрушения инструмента не наступает до тех пор, пока его период стойкости до износа  $\tau_u$  будет меньше периода стойкости до разрушения  $\tau_p$ . Вероятность разрушения инструмента  $q_p$  равна вероятности  $P(\tau_p < \tau_u)$ .

В общем виде вероятность разрушения инструмента при известных плотностях вероятностей износа  $f(\tau_u)$  и разрушения  $f(\tau_p)$  определяется:

$$q_p = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau_u) \left[ \int_{\tau_u}^{\infty} f(\tau_p) d\tau_p \right] d\tau_u. \quad (3)$$

Предположим, что  $\tau_u$  и  $\tau_p$  распределены по закону Вейбулла-Гнеденко, наиболее часто встречающемуся при эксплуатации инструментов на тяжелых станках. Подставляя соответствующие плотности распределений в (3) и делая преобразования, получим:

$$q_p = \int_0^{\infty} e^{-y} \exp \left\{ - \left[ \frac{a_p}{a_u} y \right]^{b_p} + \left( \frac{\tau_{p0} - \tau_{u0}}{a_u} \right)^{b_u} \right\} dy, \quad (4)$$

где  $a_p$ ,  $b_p$  и  $a_u$ ,  $b_u$  – параметры законов распределения периодов стойкости соответственно до разрушения и до износа инструмента;

$\tau_{p0}$  и  $\tau_{u0}$  – минимальное время соответственно до разрушения и до износа инструмента:  $y = \left( \frac{\tau_p - \tau_{p0}}{a_p} \right)^{b_p}$ .

Полученное выражение для определения вероятности разрушения инструмента справедливо для любых условий его эксплуатации. Для проверки теоретической модели получена корреляционная зависимость для условий обработки токарными резцами на тяжелых станках на 41 заводе страны ( $t=8...22$  мм;  $S=0,9...2,2$  мм/об;  $V=20...62$  м/мин). Теоретическая и статистическая зависимости согласуются с достаточной степенью достоверности.

При этом поправочный коэффициент на период стойкости, учитывающий разрушение инструмента определяется:

$$x = 1 - q_p + 0,242 q_p^{0,44}. \quad (5)$$

Для укрупненного расчета расхода  $M$ , исходя из фактической трудоемкости механической обработки  $T_{\Phi}$  за определенный период времени (месяц, год) используется зависимость:

$$M = \frac{60 T_{\Phi} K_0}{\Sigma T}, \quad (6)$$

где  $K_0$  – коэффициент основного времени, представляющий собой долю основного времени обработки от штучного.

Фактическая трудоемкость обработки деталей устанавливается путем сопоставления данных о фактической трудоемкости в истекшем году, календарного фонда работы оборудования в текущем году, а также может быть получена делением расчетной трудоемкости на средний коэффициент переработки норм. Коэффициент основного времени определяется на основании проведенных статистических анализов отношения основного времени к штучному при работе станков различных типоразмеров в различных производственных условиях и отраслей производства.

Главной особенностью обработки на станках с ЧПУ являются повышенные требования с точки зрения обеспечения надежности [9-11].

При разработке общемашиностроительных нормативов режимов резания предложено введение карт нормативов, позволяющих определить режимы резания, обеспечивающие заданный уровень надежности технологической системы. Изменение надежности достигалось регулированием величины подачи или скорости резания, от которых зависит период стойкости инструмента. Параметром надежности технологической системы принята вероятность безотказной работы или гамма-процент  $\gamma$ . Период стойкости инструмента, соответствующий уровню надежности  $\gamma$ , называемый гамма-процентным периодом стойкости  $T_\gamma$ , положен в основу расчета рациональных режимов резания с учетом надежности. Гамма-процентный период стойкости позволяет учесть рассеивание свойств режущего инструмента. При распределении стойкости по закону Вейбулла-Гнеденко, который чаще всего имеет место в соответствии со статистическими данными обработки твердосплавным инструментом, период гамма-процентной стойкости определяется:  $T_\gamma = \alpha \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{\frac{1}{b}}$ . Выразим  $T_\gamma$  через средний период стойкости и обозначим  $\eta$  поправочный коэффициент на период стойкости инструмента, учитывающий его надежность:

$$T_\gamma = \frac{T}{K_s} \left( -\ln \frac{\gamma}{100} \right)^{\frac{1}{b}} = T \cdot \eta, \quad (7)$$

где  $K_s$  – коэффициент, зависящий от степени рассеивания стойкости.

Значение коэффициента  $\eta$  для различных коэффициентов вариации стойкости и уровней надежности приведены в табл. 1.

Таким образом, ограничения, обусловленные надежностью инструмента, учитывались при расчете режимов резания введением поправочного коэффициента  $\eta$  на период стойкости в целевую функцию, представляющую собой приведенные затраты на механическую обработку, зависящие от режимов резания. Для определения рационального гамма-процента исследовалось изменение удельных приведенных затрат на механическую обработку, зависящих от уровня надежности, для станков разных

типоразмеров. При этом были сделаны следующие допущения: вводится регламентированная замена инструмента через время  $T_y$ .

Таблица 1 – Поправочные коэффициенты на период стойкости инструмента в зависимости от требуемого уровня надежности

Уровень надежности $\gamma$ , %	Коэффициент вариации стойкости $V_T$			
	0,3	0,5	0,7	0,9
	Поправочный коэффициент $\eta$			
50	1,00	0,94	0,86	0,74
60	0,92	0,83	0,71	0,56
70	0,82	0,70	0,56	0,40
80	0,72	0,56	0,42	0,26
90	0,58	0,39	0,28	0,13

Разработаны нормативы, предназначенные для выбора резцов с механическим креплением стандартных многогранных твердосплавных пластин и режимов резания при токарной обработке крупногабаритных деталей на токарных станках с числовым программным управлением.

В нормативах приведены методические указания, пример выбора инструмента и режимов резания, а также карты по выбору инструмента и режимов резания.

Данные, приведенные в нормативах, рекомендуется уточнять применительно к конкретным производственным условиям.

Нормативы имеют следующие особенности:

1. Предусмотрен поэтапный выбор типоразмера пластины и конструкции резца.

2. Рекомендуемые значения черновых подач определены из условия наиболее экономичного использования граней многогранных пластин.

Значительное влияние жесткости технологической системы на подачу, которое не поддается количественному определению и отсутствие данных о динамической жесткости станков не позволили рекомендовать однозначные решения при назначении подач.

Рекомендуемые подачи даны с учетом удовлетворительного стружколомания.

3. При определении периодов стойкости учтены особенности эксплуатации инструмента на станках с ЧПУ: работа инструмента с переменной глубиной резания, подачей и скоростью резания при различных направлениях перемещения; каждый проход выполняется на режимах, обеспечивающих наиболее полное использование станка и инструмента; инструменты работают в условиях многоинструментальной наладки, последовательного действия.

4. При расчете скоростей резания учтены особенности резцов с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин.

### **Выводы**

1. При разработке рациональных регламентов эксплуатации инструментов, которые вошли в нормативы режимов резания и норм расхода инструмента для тяжелых станков с ЧПУ, учтены особенности обработки деталей на этих станках.

2. Период стойкости инструмента, заложенный в целевой функционал, при оптимизации режимов резания учитывает не только изнашивание, но и вероятность разрушения инструментов.

3. При учете надежности инструмента, работающего на станках с ЧПУ, определен поправочный коэффициент на период стойкости в зависимости от требуемого уровня надежности 8% и фактических условий эксплуатации, которые характеризуются коэффициентом вариации стойкости инструмента.

4. Разработанные нормативы могут быть использованы как на этапе предварительного назначения режимов резания, так и для адаптивного управления в режиме реального времени.

5. Результаты исследований были использованы при проектировании тяжелого металлорежущего оборудования.

6. Для этих станков разработана и внедрена многоуровневая система принятия решений с элементами искусственного интеллекта для автоматического управления процессами резания на адаптивном оборудовании.

**Список использованных источников:** 1. Клименко Г.П. Разработка системы рациональной эксплуатации режущего инструмента / Резание и инструмент в технологических системах. – Вып. 57. – Харьков: ХГПУ 2000. – С. 110-114 2. Клименко Г.П. Анализ областей функционирования сборных резцов как составная часть маркетинга инструмента / Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко // Высокие технологии в машиностроении. – Харьков: ХГПУ, 1998. – С. 151-153 3. Клименко Г.П. Выбор рациональной конструкции режущего инструмента для тяжелых станков / Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко, С.Ю. Штученко. Сб. трудов ЗГТУ. – Запорожье: ЗГТУ, 2000. – С. 34-37 4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания. Справочник. Том 1. Токарные и карусельные работы. Фрезерные работы / Локтев А.Д., Клименко Г.П., Гуцин Н.Ф. и др. М. : Машиностроение. – 1991. – 634 с. 5. Клименко Г.П. Анализ вероятности разрушения режущих инструментов тяжелых станков / Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко, А.Ю. Андронов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – Вип. 13. – С. 77-81 6. Клименко Г.П. Вероятностный подход к оценке износа и разрушений режущего инструмента / Г.П. Клименко, А.Ю. Андронов, Н.А. Ткаченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – Вип. 20. – С. 8-12 7. Васильченко Я.В. Оптимизация процесса резания на тяжелом токарном станке и его автоматизация за счет моделирования процесса резания / Я.В. Васильченко, Д.В. Савелов, И.К. Савелова // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – Вип. 30 – С. 336-345 8. Ковалев В.Д. Анализ методов повышения эффективности процесса токарной обработки крупногабаритных деталей на станках с ЧПУ / В.Д. Ковалев, А.Н. Лищенко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – Вип. 35 – С. 55-60 9. Клименко Г.П. Надійність процесу експлуатації різального інструменту на

важких верстатах / Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко, О.Ю. Андронов, М.А. Ткаченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – Вип. 15. – С. 46-51 **10.** Клименко Г.П. Обеспечение оптимального уровня надежности твердосплавных резцов для тяжелых станков / Высокие технологии в машиностроении. – Харьков: ХГПУ, 1999. – С. 48-49 **11.** Клименко Г.П. Определение надежности обслуживания режущего инструмента / Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко // Высокие технологии в машиностроении. – Харьков: ХГПУ, 2000. – С. 134-137.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Klimenko G.P. *Razrabotka sistemy racional'noj jekspluatatsii rezhushhego instrumenta / Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah.* – Vyp. 57. – Har'kov: HGPU 2000. – S. 110-114 **2.** Klimenko G.P. *Analiz oblastej funkcionirovanija sbornyh rezcov kak sostavnaja chast' marketinga instrumenta / G.P. Klimenko, Ja.V. Vasil'chenko* // *Vysokie tehnologii v mashinostroenii.* – Har'kov: HGPU, 1998. – S. 151-153 **3.** Klimenko G.P. *Vybor racional'noj konstrukcii rezhushhego instrumenta dlja tjazhelyh stankov / G.P. Klimenko, Ja.V. Vasil'chenko, S.Ju. Shtuchenko. Sb. trudov ZGTU.* – Zaporozh'e: ZGTU, 2000. – S. 34-37 **4.** *Obshhemashinostroitel'nye normativy rezhimov rezanija. Spravochnik. Tom 1. Tokarnye i karusel'nye raboty. Frezernye raboty / Loktev A.D., Klimenko G.P., Gushhin N.F. i dr. M. : Mashinostroenie.* – 1991. – 634 s. **5.** Klimenko G.P. *Analiz verojatnosti razrushenija rezhushhih instrumentov tjazhelyh stankov / G.P. Klimenko, Ja.V. Vasil'chenko, A.Ju. Andronov* // *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zb. nauk. prac'.* – Kramators'k : DDMA, 2003. – Vip. 13. – С. 77-81 **6.** Klimenko G.P. *Verojatnostnyj podhod k ocenke iznosa i razrushenij rezhushhego instrumenta / G.P. Klimenko, A.Ju. Andronov, N.A. Tkachenko* // *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zb. nauk. prac'.* – Kramators'k : DDMA, 2006. – Vip. 20. – С. 8-12 **7.** Vasil'chenko Ja.V. *Optimizacija processa rezanija na tjazhelom tokarnom stanke i ego avtomatizacija za schet modelirovanija processa rezanija / Ja.V. Vasil'chenko, D.V. Savelov, I.K. Savelova* // *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zb. nauk. prac'.* – Kramators'k: DDMA, 2012. – Vip. 30 – С. 336-345 **8.** Kovalev V.D. *Analiz metodov povysenija jeffektivnosti processa tokarnoj obrabotki krupnogabaritnyh detalej na stankah s ChPU / V.D. Kovalev, A.N. Lishenko* // *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zb. nauk. prac'.* – Kramators'k : DDMA, 2015. – Vip. 35 – S. 55-60 **9.** Klimenko G.P. *Nadijnist' procesu ekspluatatsii rizal'nogo instrumentu na vazhkih verstatah / G.P. Klimenko, Ja.V. Vasil'chenko, O.Ju. Andronov, M.A. Tkachenko* // *Nadijnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih sistem. Zb. nauk. prac'.* – Kramators'k : DDMA, 2004. – Vip. 15. – С. 46-51 **10.** Klimenko G.P. *Obespechenie optimal'nogo urovnja nadezhnosti tverdosplavnyh rezcov dlja tjazhelyh stankov / Vysokie tehnologii v mashinostroenii.* – Har'kov : HGPU, 1999. – С. 48-49 **11.** Klimenko G.P. *Opredelenie nadezhnosti obsluzhivaniya rezhushhego instrumenta / G.P. Klimenko, Ja.V. Vasil'chenko* // *Vysokie tehnologii v mashinostroenii.* – Har'kov: HGPU, 2000. – С. 134-137.